

고강도 콘크리트를 적용시킨 신형식 거더의 동적해석 및 안정성 평가

Dynamic Analysis and Safety Estimation of New Type Girder Filled by High-Strength Concrete

최 성 우* 이 학** 공 정 식***
Choi, Sung Woo Lee, Hak Kong, Jung Sik

ABSTRACT

CFT(Concrete Filled Steel Tubular) Structure filled steel tubes with a concrete improves the stiffness and strength of the structure by the confinement effect of fillers. CFTA(Concrete Filled and Tied Steel Tubular Arch) girder is a new type structure that applies an arch structure and a pre-stressed structure to CFT Structure to maximize the efficiency of structure and economic. One of conspicuous characteristics of CFTA girder is exposed tendon and that is pointed out as the weak point of this girder. Therefore in this study, safety estimation for the exposed tendon is performed and dynamic analysis is also performed by the collision numerical simulation. For analyzing this model, ABAQUS 6.5-1 was used.

요 약

강관의 내부에 콘크리트를 충전한 구조인 콘크리트 충전 강관 구조(Concrete Filled Steel Tubular Structure, CFT 구조)는 강재와 콘크리트의 단점을 상호 보완하고 장점을 극대화 할 수 있다는 이점이 있다. 이와 같은 CFT 거더의 장점을 살리면서 CFT 거더보다 더 뛰어난 경제적, 구조적 효율성을 얻기 위해 기존의 CFT 구조에 아치 형식과 프리스트레스를 도입한 신형식 거더인 CFTA(Concrete-Filled and Tied Tubular Arch) 거더에 대한 연구가 현재 진행 중이다. CFTA 거더의 가장 큰 특징은 아치형상과 외부로 노출되어 있는 텐던인데 현재 연구과정에서 지적되고 있는 문제점 중의 하나는 외부로 노출된 텐던의 안전성에 관한 문제이다. 따라서 본 논문에서는 외부로 노출되어 있는 텐던에 대한 안전성 평가를 수행하였다. 또한, collision numerical simulation을 사용하여 동적 충돌에 대한 해석도 수행하였다. 모델의 해석을 위해 유한요소 해석 결과의 신뢰성이 높고, 타 연구에서도 많이 사용되고 있는 ABAQUS 6.5-1을 이용하였다.

*정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학과, 구조해석연구실, 석사과정

**정회원, 현대중공업

***정회원, 고려대학교, 건축사회환경공학과, 부교수

1. 서론

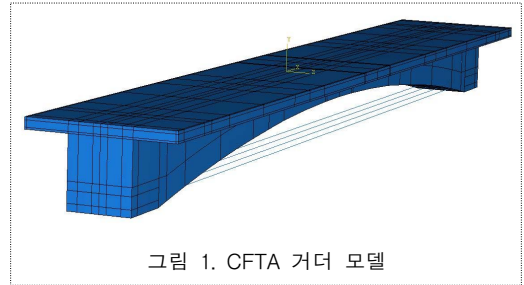
구조물의 시공에서 더 경제적이고 안정적인 결과를 얻기 위해 전 세계적으로 교량의 상부구조에 관한 다양한 연구개발이 진행 중이다. 그 중, 강관 내부에 콘크리트를 충전한 콘크리트 충전 강관구조(CFT 구조)는 강재와 콘크리트의 단점을 상호 보완하고 장점을 극대화 할 수 있다는 이점 때문에 실제 구조물의 시공에 적용하는 사례가 증가하고 있다. CFT 거더의 장점을 포함해 더 뛰어난 경제적, 구조적 효율성을 얻기 위해 기존의 CFT 구조에 아치 형식과 프리스트레스를 도입한 CFТА 거더에 대한 연구가 진행 중이다. CFТА 거더의 특징은 아치형상과 외부로 노출되어 있는 텐던으로 연구과정에서 지적되고 있는 가장 큰 문제점 중의 하나가 외부로 노출된 텐던의 안전성 문제이다. 따라서 본 논문에서는 외부 노출형 텐던에 릴렉세이션과 같이 점차적으로 긴장력이 줄어드는 상황, 혹은 충돌과 같은 사고들이 발생하여 텐던이 완전히 파괴되는 상황 등을 가정하여 동적 및 정적 안전성 평가를 수행하였다.

2. CFТА 거더(Concrete-Filled and Tied Steel Tubular Arch Girder)와 해석 모델

CFТА 거더 내부에 충전 된 콘크리트의 상면은 일정한 높이를 유지하며, 하부는 아치 형상을 이룬다. 하부에 노출되어 있는 강선에는 긴장력(Prestress)을 도입해, 구조물의 경량화 및 안전성을 높일 수 있도록 하였다. 해석에 사용된 거더의 형상은 총 지간 25.6m, 폭 1.5m, 높이 1.5m이며, 이 위에 폭 3.5m, 높이 0.24m의 슬라브가 올려져 있다. 거더 하부에는 4개의 긴장재가 일정한 간격으로 연결되어 있으며, 중앙에 위치한 2개의 긴장재는 1차 긴장재, 양 끝부분에 위치한 2개의 긴장재는 2차 긴장재이다. 아바쿠스를 사용하여 모델링한 전체적인 모델의 모습은 그림 1과 같고 사용된 각 재료의 물성치는 표 1과 같다. 표 1에서 보이는 바와 같이 본 연구에서는 일반 강도 콘크리트를 사용하였을 경우와 고강도 콘크리트를 사용하였을 경우의 차이점을 알아보기 위하여 콘크리트를 제외한 모든 재료의 물성치를 동일하게 입력 한 후 해석을 실시하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 물성

물성	단위질량	탄성계수	포아송비
강재	7.85t/m ³	200000	0.3
내부 충전 콘크리트	2.5t/m ³	35 MPa	180 MPa
		29885.3	58011
슬라브 콘크리트	2.5t/m ³	16 MPa	180 MPa
		21500	58011
텐던	7.938t/m ³	210000	0.3
슬래브	1.56t/m ³	200000	0.3



3. 정적 안전성 평가

그림 1과 같이 CFТА 거더의 긴장재는 외부로 노출되어 있는 형태이기 때문에 외부 충격에 취약하다는 약점이 있다. 이에 긴장재의 단면적을 100%, 50% 0%(파괴)로 줄여가면서 각 상태 별 구조물의 응력을 관찰하였다. 시공 시 안쪽 1차 긴장재가 먼저 시공되고 슬라브 타설 후, 2차 긴장재가 시공된다. 1차 긴장재가 안쪽에 위치하고 있기 때문에 외측에 위치한 2차 긴장재가 외부 충격에 의해 손상을 입을 확률이 더 크다고 판단되었다. 이에 따라 우선 외측에 위치한 2차 긴장재 하나의 단면적을 줄이면서 해석을 실시하기로 하였다. 또한 하나의 2차 긴장재가 파괴된 후, 또 다른 긴장재가 파괴되었을 경우의 거동을 알아보기 위해 2차 긴장재 2개가 모두 파괴되었을 경우와 2차 긴장재가 파괴 된 후, 옆에 위치한 1차 긴장재가 파괴될 경우도 고려하여 해석을 실시하였다. 해석 결과는 다음과 같다.

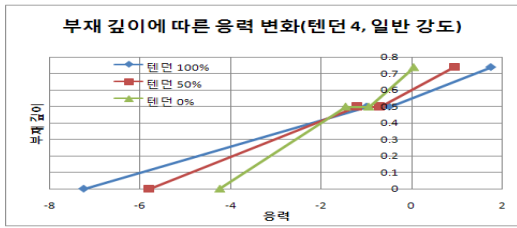


그림 2. 2차 텐던 1개 순차 제거(일반 강도)

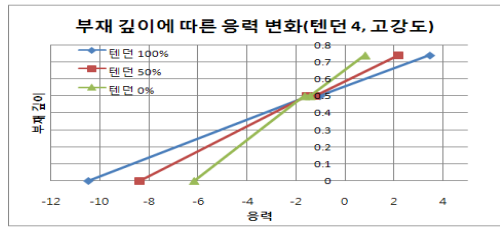


그림 3. 2차 텐던 1개 순차 제거(고강도)

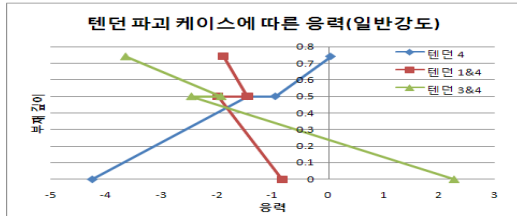


그림 4. 텐던 2개 이상 파괴(일반 강도)

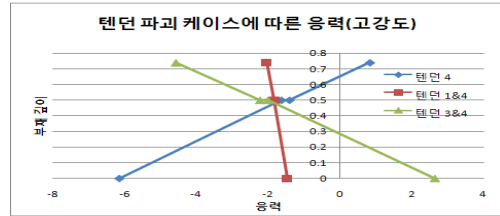


그림 5. 텐던 2개 이상 파괴(고강도)

3. 동적 해석

동적해석은 CFTA 거더의 가장 취약 부분인 긴장재 부분의 충격에 대해서 20ms의 시간 간격의 변화에 따라 해석하였다. 이러한 유한요소 모델링 해석에서 시간 변화에 따른 충격량의 변화, 응력·변형률 관계, 그리고 가장 취약한 부분의 변위 등에 대한 데이터를 구하였다. 충격 시험의 수치해석 모델은 크게 충돌체와 CFTA 거더로 구분할 수 있다. 둘 중 첫 번째 부분인 충돌체는 길이 3000mm, 너비 800mm, 그리고 높이 400mm의 직각각형 모형의 강제 빔을 나타내며, 또 다른 부분인 CFTA 거더는 정적인 거동 하에 변화가 없다고 가정하였고 물성치를 포함한 전체적인 모델은 정적 안전성 평가에 사용되었던 모델과 동일하다.

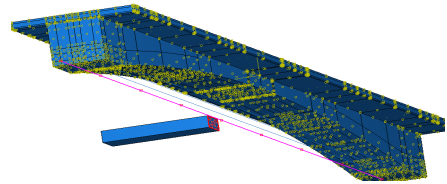


그림 6. 동적 해석을 위한 모델

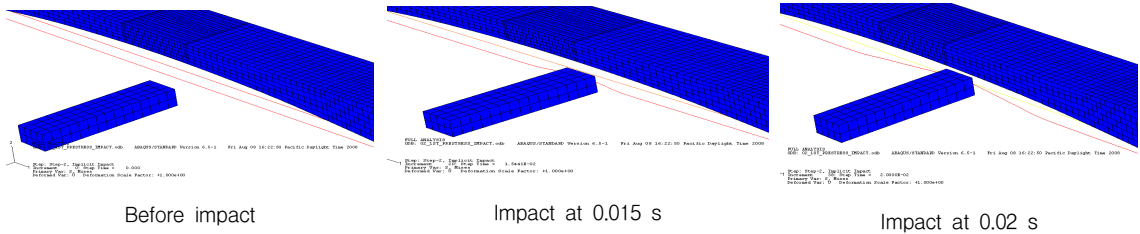
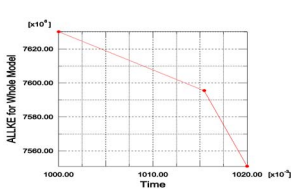
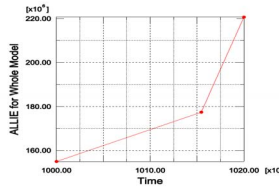


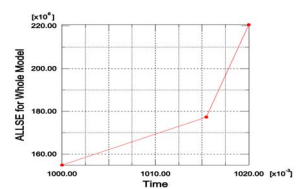
그림 7. 시간에 따른 텐던과 충돌체의 충돌 거동



Kinetic Energy



Internal Energy



Strain Energy

그림 8. 충격이 가해지는 동안의 다양한 에너지의 변화

4. 결론

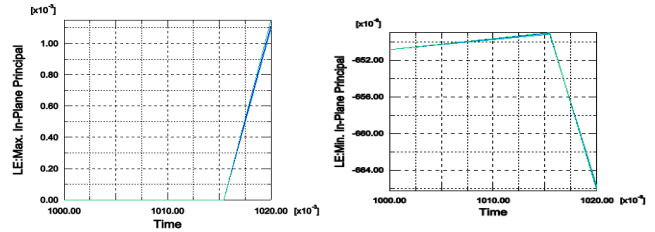
그림 2와 3에서 볼 수 있듯이 2차 긴장재 하나만 파괴되었을 경우, 일반강도와 고강도 콘크리트를 적용시킨 모델 모두, 모든 부재가 받고 있는 응력이 허용 응력 이하로 나타났다. 즉, CFTA 거더에서 하나의 2차 긴장재가 끊어지는 경우에도 구조물은 안전할 것으로 판단된다. 그림 4와 5에서는 긴장재가 2개 이상 끊어질 경우, 슬래브 상부 방향으로 갈수록 압축력이 커지고 콘크리트 하부 방향으로 갈수록 인장력이 증가하는 것을 알 수 있다. 하지만, 일반 강도 콘크리트가 적용된 거더의 경우, 1차 긴장재와 2차 긴장재가 하나씩 끊어진 상황에서 콘크리트 하부가 받는 최대 인장응력인 2.26MPa이 여전히 허용 인장응력보다 작음으로 구조물은 안전한 상태를 알 수 있다. 고강도 콘크리트를 적용한 거더의 경우도 같은 상황에서 콘크리트 하부가 받는 인장응력이 허용 인장응력보다 훨씬 작음으로 안전함을 알 수 있다.

충격에 의한 동적 거동의 비선형 해석을 위해 Hilber-Huges-Taylor 연산을 사용하였다. 충격에 의한 동적 거동은 일반적으로 불연속적 비선형 특성을 보인다. 그림 7은 충돌의 시간 변화에 따른 프레임의 유한요소 해석을 보여준다. 위의 수치해석 모델은 추후 실제 동적실험 결과와의 비교를 위해 수행되었다. 그림 8은 충격이 발생하는 동안 발생하는 에너지 변화를 보여준다. 변형률은 구조물의 거동을 해석하는데 있어 가장 중요한 요소 중 하나이므로 본 연구에서는 구조물의 가장 취약한 부분인 긴장재의 중앙부에서의 변형률을 해석하였다.(그림 9)

안전성 평가 부분에 있어 아직 부족한 부분이 많기 때문에 추후 추가적인 연구가 이루어질 예정이며, 같은 모델을 이용하여 비선형 해석 등을 수행, 구조물의 거동에 대해서도 조금 더 연구할 예정이다. 또한 동적 해석 부분에서 제시된 모델의 해석은 수치해석 모델링이 새로운 형식의 교량의 취약점을 찾아냄은 물론 보편적인 설계 및 해석분야의 향상을 위한 강력한 틀로 사용될 수 있다는 것을 보여주었다. 본 연구의 해석 결과는 동적 해석을 위한 현장에서의 충격 실험 결과와의 비교 및 추후 논의될 취약성 평가(vulnerability assessment), 취약성 평가 (fragility analysis) 등의 연구에 바탕이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부의 건설핵심기술 연구개발(05건설핵심D11)의 일환인 “고성능·다기능 콘크리트 개발 및 활용기술” 연구과제 및 ‘CFTA 거더의 안전성 및 경제성 평가’(06건설핵심D14) 연구과제로 수행되었으면 이에 감사드립니다.



텐던 3의 변형률 텐던 2의 변형률
그림 9. 텐던 중앙부 변형률의 시간 이력

참고문헌

1. 박 호, 박명균, 박경훈, 김정호 “콘크리트 충전된 타이드 아치형 강재 합성거더의 개발”, 대한토목학회 학술발표대회 논문집, 2006. pp. 2289~2292.
2. 이 학, 박 호, 이은호, 김정호, 공정식 “콘크리트 충전 타이드 아치형 강재 합성 거더의 선형 거동 분석”, 춘계 전산구조공학회 학술대회 논문집, 2007. pp. 688~693
3. 유성원, 홍경욱 “부분 부착 강성모델을 이용한 외부 프리스트레스드 콘크리트의 보의 휨해석 및 휨 성능 개선”, 대한토목학회논문집, 2000. pp. 813~821.